УДК 662.6.536.5

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ СЖИГАНИЯ УГЛЕЙ С УЧЕТОМ ИХ МИНЕРАЛЬНОЙ ЧАСТИ: СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

А.С. Заворин, Ю.Я. Раков

Томский политехнический университет
E-mail: ghost@tpu.ru

Рассматриваются модели, применяемые для численного исследования процессов с участием минеральной составляющей твердого топлива в технологиях энергетического сжигания.

Введение

Численное моделирование условий и процессов с участием минеральной составляющей при сжигании углей в котлах развивается, с одной стороны, как инструмент оперативного расширения научной основы для исследования проблемы шлакования и золового загрязнения поверхностей нагрева. С другой стороны, возможности моделирования для прогноза последствий и корректировки конструкторских и эксплуатационных решений стимулируют разработку экспертных систем и автоматизированных систем контроля и диагностирования состояния поверхностей нагрева котлов и образования натрубных отложений. Поскольку такие работы невозможны без использования математического аппарата, который описывает эти сложные и многофакторные процессы, то прогресс зависит главным образом от наработок в теории физико-математического описания закономерностей турбулентного переноса в двухфазной среде, химического реагирования и теплообмена, динамики аэродисперсного потока в пучках труб, гетерофазных взаимодействий в проницаемом слое и др. Наличие существенного задела в области лабораторного и натурного эксперимента по

основным процессам горения и аэромеханики способствовало созданию адекватных математических моделей. Анализ состояния дел в этой области [1] констатирует, что «математическое моделирование котельного оборудования становится одним из важнейших способов получения наиболее представительной информации об аэродинамике, локальном и суммарном теплообмене». На этом фоне моделирование процессов с участием минеральной части (МЧ) выглядит менее проработанным и более фрагментарным. Объяснение этому находится, главным образом, в том, что эти процессы являются следствием всех других многофакторных явлений массо- и теплообмена при горении и динамике аэродисперсных смесей и поэтому наиболее сложны для разработки обобщающих математических моделей и доступных для их реализации численных алгоритмов.

Преобразование угольной частицы

Поскольку одним из основных факторов преобразования МЧ топлива является температура, прогнозирование свойств минеральных составляющих пылеугольных частиц возможно с учетом динамики температурных условий. Такой подход к исследованию преобразования минеральных веществ в увязке с температурными изменениями в топке и частице разрабатывался В.В. Померанцевым с сотрудниками [2, 3], причем в одной из работ [3] моделировались траектории движения частиц, а по зонам столкновения их с ограждающими поверхностями предлагалось предсказывать локализацию шлакования или абразивного износа. Однако в качестве частиц рассматривались лишь обособленные внешние минералы, а их преобразование ограничивалось лишь термическим разложением, что является начальной стадией в условиях топочного процесса. На этом, в частности, сказалось отсутствие данных о количественных оценках минералогических форм в составе МЧ.

Общее построение модели температурных преобразований МЧ в составе угольной частицы проведено [4] на основе те

$$\delta\Theta_{L} + \delta\Theta_{I} + \delta\Theta_{г} =$$

$$= \delta\Theta_{I} + \delta\Theta + \delta\Theta + \delta\Theta + \delta\Theta,$$

главные составляющие которого известны из работ по горению твердого топлива [5]:

– теплота, по $\delta\Theta_{L} = \sigma\varepsilon\chi(\;^{4} - \;^{4})\;\tau,$ (1)

– теплота,

$$\delta\Theta = Nu\frac{\phi^{2}\cdot\lambda_{г}}{\varsigma}(\;_{г} - \;)\;\tau, \qquad (2)$$

– теплота от сгорания коксового остатка

$$\delta\Theta_{г} = [(\Theta_{1}\beta_{1}\alpha_{1}' + \Theta_{2}\alpha_{2}')X - \Theta_{21}\alpha_{21}'X_{2}]\times \qquad (3)$$

$$\times\frac{273}{T_{г}}\phi\,\delta\tau,$$

– изменение тепл $\delta\Theta_{ч} = \rho_{ч}\varsigma_{ч}\chi_{ч}\delta T_{ч},$ (4)

– теплота, затраченная на нагрев O_2 и CO_2,

$$\delta\Theta_{д} = \chi_{г}\phi_{ч}(X_{ч} - \;_{г})(\alpha'X + \frac{44}{32}\alpha_{21}'\;_{2})\;\tau, \qquad (5)$$

где: σ – коэффициент излучения абсолютно черного тела; ε – степень черноты; χ – коэффициент облученности (угловой коэффициент); $T_{ср}$ – температура облучающей среды, К; $T_ч$, $c_ч$, $V_ч$, $f_ч$, $\rho_ч$ – соответственно температура, теплоемкость, объем, поверхность, плотность частицы; $T_г$, $\lambda_г$, $c_г$ – соответственно температура, коэффициент теплопроводности и теплоемкость газов; α'_1, α'_2, α'_{21} – константы скорости реакций соответственно образования CO, CO_2 и восстановления CO_2; Q_1, Q_2, Q_3 – тепловые эффекты этих реакций; C_R, C_{2R} – концентрации соответственно кислорода и углекислого газа у поверхности частицы, выраженные через концентрацию кислорода; β_1 – коэффициент, учитывающий изменение числа молей при протекании реакции $2C + O_2 =$ $(\alpha' = \beta_1 + \alpha_2')$; анта скорости потребления кислорода 44/32 – мольное соотношение CO_2 и O_2. (6)

Составляющие теплового баланса, характеризующие термическое разложение, имеют вид:

– теплота на $\delta\Theta_{\varsigma} = (I\,\delta\Omega + \chi\;)\;\rho\,\cdot$, (7)

– теплота на $\delta\Theta\varsigma = (\Theta\,\varsigma + \chi_{L}\;)\;\rho_{L}\;_{L},$ (8)

где: I – теплота испарения воды; $c_{вп}$, $c_л$ – соответственно мкость водяного пара и летучих ингредиентов; ρ, ρ_L – их плотность; $Q_{разл}$ – теплота разложения горючей массы с выделением летучих; dW, $dV_л$ – соответственно количество влаги и летучих веществ, выделившихся из частицы за время dτ.

Теплота, затраченная на преобразования минеральных вещест

$$\delta\Theta\chi = \sum_{i=1}^{n}\varsigma\Theta\rho\,\delta(\;+\;)\;\mu, \qquad (9)$$

α: n – количество учитываемых компонентов; χ доля i-ого компонента в неорганической мас Θ – теплоемкость минера ого включения; – тепловой эффект реакции; μ – доля прореагировавшей части i-ого минерального компонента.

Подстановкой (2–9) в (1) последнее уравнение приводится к виду:

$$\frac{\delta I}{\delta\tau} = \frac{\sigma\varepsilon\chi}{\rho\chi}(\;^{4} - \;^{4})\frac{\phi}{\varsigma} +$$

$$+\frac{Nu\,\lambda_{г}}{\rho_{ч}\chi}(\;_{г} - \;)(\frac{\phi}{\varsigma})^{2} +$$

$$+\frac{[(\Theta_{1}\beta_{1}\alpha_{1}' + \Theta_{2}\alpha_{2}')X - \Theta_{21}\alpha_{21}'X_{2}]273\,\phi}{\rho\,\varsigma_{г}} -$$

$$-\frac{\;_{г}\phi(\; - \;_{г})}{\rho\chi\varsigma}\times$$

$$\times(\alpha'X + \frac{44}{32}\alpha_{21}'X_{2}) - \frac{(\;+\chi\;)\rho}{\rho\chi}\times$$

$$\times\frac{\delta\Omega}{\delta\tau} - \frac{(\Theta + \chi_{L}\;)\rho_{L}}{\rho\chi}\cdot\frac{\delta\varsigma_{L}}{\delta\tau} -$$

$$-\sum_{i=1}^{n}\frac{\rho\,\alpha}{\rho\chi}(\;\Theta + \;)\frac{\delta\mu}{\delta\tau}.$$

Уравнение химической кинетики для реагирующего

минерального компонента запишется:

$$\frac{\delta\mu_i}{\delta\tau} = \kappa_{oi}\exp\left(-\frac{E_i}{PT_l}\right)\left(\alpha_i^{\delta} - \mu_i\right)^{v_i}, \qquad (10)$$

где n_i – порядок реакции, k_{oi} – предэкспонентный множитель, E – энергия активации; μ_i – текущее содержание i-ого компонента.

Уравнение на температуру газовой смеси $T_г$ для совместного решения с (10) выводится из теплового баланса объема газовой смеси:

$$\delta\Theta = \delta\Theta_{г}^{l} + \delta\Theta_{гCO} + \delta\Theta_{(CO+CO_2)} + \delta\Theta + \delta\Theta_{l} + \delta\Theta_{L} - \delta\Theta \qquad (11)$$

и представлено [6] в следующем виде:

$$\frac{\delta T_г}{\delta\tau} = \frac{\Theta_{12}\alpha'_{12}X_1}{\chi_г} + \frac{\left[\left(\frac{56}{32}\beta_1\alpha'_1 + \frac{44}{32}\alpha'_2\right)X_P + \frac{56}{32}\alpha'_{21}X_{2P}\right]}{\varsigma_г\rho_г} \times$$

$$\times\frac{273}{T_г}(\;-\;_г) + \frac{\alpha\varsigma\rho\chi}{\varsigma_г\rho_г\chi_г}(\;-\varsigma_L)(\;-\;_г) +$$

$$+\frac{\alpha_г\Theta\rho}{\chi_l}(\;-\;_г) + \frac{Nu\,\lambda_г\phi_l}{\chi_г\varsigma_г(\;/\phi_l)}(\;-\;_г) +$$

$$+\frac{\sigma\Sigma}{\chi_г\varsigma_г}(\;^4 - \;_г^4) - \frac{\varsigma\rho\,г}{\chi_г\varsigma_г}\cdot\frac{\delta\Omega}{\delta\tau},$$

где C_1 – концентрация CO в расчетном объеме; α'_{12}, Θ_{12} – соответственно константа скорости и тепловой эффект реакции горения CO; 56/32 – мольное соотношение CO и CO_2 к O_2; $a_ф$ – степень черноты газовой среды; V^{daf} – относительный выход летучих веществ, отнесенный к горючей массе топлива.

Скорость испарения влаги определено согласно [7]:

$$\frac{\delta\Omega}{\delta\tau} = \frac{6Nu\lambda_г(T_г - T_l)\Omega}{\delta_l\rho_l I(A + B\Omega)}, \qquad (12)$$

где $T_м$ – температура мокрого термометра; W – относительная влажность; A и B – экспериментально определенные коэффициенты; δ_0 – исходный размер частицы.

Уравнение для концентрации диоксида углерода и кислорода в расчетном объеме газовой смеси [6]:

$$\frac{\delta X_2}{\delta\tau} = \frac{\phi_l}{\varsigma_г}(\alpha'_2 X_P - \alpha'_{21}X_{2P}) + \alpha'_{21}X_1 + \kappa_2\alpha\rho(\varsigma_L - \varsigma_L), \qquad (13)$$

$$\frac{\delta X}{\delta\tau} = -\left[\frac{\phi_l}{\varsigma_г}X_P(\alpha'_2 + \beta_1\alpha'_1) + \alpha'_{21}X_1 + \kappa\alpha\rho(\varsigma_L - \varsigma_L)\right], \qquad (14)$$

где: k, k_2 – коэффициенты пересчета, учитывающие соответственно состав летучих веществ и долю диоксида углерода от состава летучих веществ в общем объеме их продуктов сгорания; C_2, C – концентрация соответственно CO_2 и O_2 в расчетном объеме.

Скорость выделения и сгорания летучих веществ горючей массы [...] уравнениями:

$$\frac{\delta\varsigma_L}{\delta\tau} = \alpha\left(\varsigma^{\delta a\phi} - \varsigma_L\right), \qquad (15)$$

$$\frac{\delta\varsigma_L}{\delta\tau} = \alpha\left(\varsigma_L - \varsigma_L\right). \qquad (16)$$

Численная модель, представляющая собой систему [...] $X = X$ [...] $= 0$, $\Theta = $ [...], и $T = T$, и $\tau = 0$, $\varsigma_L = 0$, $\varsigma = 0$, $\Omega = \Omega_0$, $\mu_T = 0$, реализована [6] для вариантов с различными [...], δ_0, избытками воздуха, минеральными включениями. (17)

Полученные результаты позволяют проводить предварительную оценку габаритов камерной топки, однако возможности моделирования ограничены из-за состояния информации об исходных компонентах МЧ в частицах угля. Кроме того, численную модель можно сопрягать с аэродинамикой топки только для частиц мелких классов, у которых отсутствует витание относительно потока, что соответствует $Nu = 2$.

Образование натрубных отложений

Модель динамики образования золошлаковых отложений предложена [8] для условий, где превалируют процессы шлакования. За интегральную оценочную величину принято используемое в нормативных методиках значение коэффициента загрязнения:

$$\xi_l = \delta_l / \lambda_l,$$

представляющего собой термическое сопротивление слоя, где: $\delta_з$, $\lambda_з$ – соответственно толщина и коэффициент теплопроводности натрубных отложений.

Толщина слоя отложений изменяется от времени и от интенсивности процесса закрепления частиц в слое:

$$\delta_l = \int_{\tau_1}^{\tau_2}\gamma_{Jl}\,\delta\tau,$$

где: $(\tau_2 - \tau_1)$ – временной диапазон протекания процесса, $g_{шл} = f(t)$ – интенсивность шлакования, определяемая по формуле [9]:

$$g_{Jl} = \omega_l X_l E'_{Jl},$$

где: $\omega_ч$ – скорость потока; $C_ч$ – концентрация частиц в потоке; E' – коэффициент вероятности столкновений частиц с поверхностью; $K_{шл}$ – коэффициент шлакования, представляющий собой долю закрепившихся частиц относительно столкнувшихся с поверхностью.

Входящие в (18) величины определятся:

– скорость золовых и шлаковых частиц в пограничном

слое по уравнению [10]

$$\omega_I = \frac{3^{®}\eta_г\lambda^{®}_г(\ \ _г - \ _I)}{2^{\pi M}(2\lambda_г + \lambda_I)\delta_I}, \quad (18)$$

где R – универсальная газовая постоянная, p – дав- $\delta_I = 0,8^\rho/\sqrt{Re}$ - молекулярный вес газовой среды, толщина пограничного слоя по периметру трубы под углом к направлению потока 90° [11]; r – радиус трубы; $\eta_г$ – кинематическая вязкость газа; $T_з$ – температура поверхности отложений;

– концентрация золы в потоке

$$\alpha_I = \frac{B_\pi A^\rho}{100 \cdot \varsigma_{\circledcirc}} \ _{ГК},$$

где B_π – расчетный р$\varsigma_{\circledcirc}$ од угля; A^ρ – зольность р$\alpha_{ГК}$ чего состояния угля; – объем дымовых газов;

– доля золы, уносимой из топки в газоходы;

– коэффициент вероятности столкновения частиц с поверхностью трубы [9]

$$E' = \int_0^1 E_\delta 6,9^\nu \Delta^{\nu-1\varepsilon-6,9\Delta^\nu \delta} \Delta,$$

где E_δ – коэффициент $\Delta = \delta/\delta_{\mu\alpha\xi}$ стиц, n – показатель полидисперсности и – относительный размер частиц, определяемые по уравнению Розина-Раммлера [9]; (19)

– коэффициент шлакования [8]

$$K_{ЛL} = \frac{1}{1 + \frac{(\theta_L + \theta_I)\omega_I \ _I \ '\tau^2 K}{\lambda_I \rho_I^2}},$$

где $\theta_L, \theta_к$ – радиационный и конвективный тепловой поток, воспринятый поверхностью нагрева, $\rho_з$ – плотность золового отложения, K – коэффициент, учитывающий энергетический баланс взаимодействия с поверхностью нагрева золошлаковых частиц как совокупности твердых, размягченных и расплавленных частиц.

Коэффициент K в (20) зависит от разницы температур между газовым потоком и натрубными отложениями, от скорости частиц, от теплопроводности газов и натрубных отложений, от реологических свойств. В свою очередь, реологические свойства рассматриваются как функция минерального состава частицы, состава газовой среды и температуры частицы, для расчета которых используются уравнения системы (10–(20)) Поэтому применение модели осложнено теми же ограничениями, что были отмечены для данной системы. Кроме того, расчет концентрации частиц в потоке по (19) дает среднее по топке значение, в основе которого лежит нормативная величина выноса золы из топки $\alpha_{ГК} = 1 - \ _{ЛL}$,мая из сокращенного золового баланса. Здесь $\delta_{ЛL}$ представляет собой коэффициент шлакоулавливания, который зависит от фракционного состава дисперсной среды, аэродинамической и температурной обстановки в зоне активного горения, а поэтому связан с режимными факторами.

Для повышения эффективности моделирования загрязнения поверхностей нагрева следует моделировать локальную концентрацию золовых частиц в потоке, а это связано с расчетом процесса шлакоулавливания.

Другим важным ограничением в рассматриваемой модели является отсутствие увязки коэффициента теплопроводности натрубных отложений с трансформацией слоя, выражающейся в изменении состава и плотности.

Параметры пылегазовой среды

Один из подходов к оценке полей температур, скорости, концентрации двухфазного потока в топке и газоходах котла представляет собой использование численной методики ТГУ [12]. Математическая модель состоит из двух систем уравнений. Одна из них предназначена для исследования пространственного стационарного турбулентного движения газовой среды в объеме топки, базируется на уравнениях Рейнольдса и "$k-\varepsilon$" – модели турбулентности. Способ задания граничных условий для системы уравнений определяется типом границы. Для входных границ (сечение ввода первичного и вторичного воздуха) используются однородные распределения для всех характеристик течения. На выходе из расчетного объема ставятся мягкие граничные условия, причем расположение выходной границы должно быть достаточно удалено от зон возможной рециркуляции потока. В качестве граничных условий на стенках топочной камеры используется метод пристеночных функций Лаундера-Сполдинга.

Модель была протестирована на экспериментальных данных визуализации течения, полученных в ТПУ при гидравлическом моделировании топки котла БКЗ-220-100 ЖШ. Результаты тестовых расчетов дают основания применять данную модель для численного исследования аэродинамики топок.

Другая система уравнений описывает движение частиц в рамках лангражева подхода с учетом динамического теплового скольжения относительно газа и с учетом их горения. При этом частицы считаются сферическими, а столкновения их между собой не учитываются. В качестве начальных условий используются значения величин, соответствующие местоположению, скорости, температуре и размеру частицы в выходном сечении горелки.

Основные системы уравнений могут сопрягаться с моделью теплообмена и течения жидкой шлаковой пленки, образующейся на стенках камеры сгорания топки [13]. С учетом этого дополнения оказалось возможным исследовать эффективность управляющего воздействия как на поведение топливо-воздушной смеси, так и на распределение МЧ между шлаком и уносом от ряда конструктивно-режимных факторов топочного процесса: сочетания включенных в работе горелок, ориентации горелочных струй, тонкости помола, конфигурации камеры.

Заключение

Состояние проблемы численного моделирования процессов сжигания углей характеризуется наличием адекватного физико-математического описания применительно к отдельным стадиям поведения минеральной

части топлива в котельных агрегатах. Повышение эффективности моделирования связано с построением укрупненных моделей на базе частных, что оправдано после повышения эффективности имеющихся фрагментов моделирования за счет устранения недостаточности или неопределенности информационной базы по минеральной части углей. Прежде всего это относится к оценке содержания компонентов, термофизическим характеристикам и параметрам их изменения. Необходимость их экспериментального исследования как основного пути решения вопроса по-прежнему актуальна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеенко С.В., Дектерев А.А., Елгин Б.А. и др. Перспективы численного моделирования тепломассообмена в энергетике // Проблемы использования канско-ачинских углей в энергетике: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 339–341.
2. Померанцев В.В., Лихачева Г.Н. Кинетика химических превращений некоторых компонентов минеральной части топлива в процессе сжигания // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Матер. II Всес. конф. – Таллин: ТПИ, 1974. – С. 56–62.
3. Усик Б.В., Захаров В.Ю., Померанцев В.В. Метод расчета поведения минеральной части топлива в топочной камере // Влияние минеральной части энергетических топлив на условия работы парогенераторов: Тез. докл. III Всес. конф. – Таллин: ТПИ, 1980. – Т. 1А. – С. 138–144.
4. Заворин А.С., Лебедев И.К., Некряч Е.Н. Температурные режимы преобразования минеральных примесей при горении пылеугольных частиц канско-ачинских углей // Горение органического топлива: Матер. III Всес. конф. – Новосибирск: Наука, 1985. – Ч. 1. – С. 70–74.
5. Виленский Т.В., Хзмалян Д.М. Динамика горения пылевидного топлива. – М.: Энергия, 1978. – 248 с.
6. Некряч Е.Н. Температурные условия преобразования минеральных примесей при пылевидном сжигании углей Канско-Ачинского бассейна: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Томск: ТПИ, 1984. – 21 с.
7. Радивоев К.А. Разработка и исследование методов сжигания высокозабалластированных топлив в энергетических парогенераторах: Автореф. дис. … канд. техн. наук. – Л.: ЛПИ, 1979. – 22 с.
8. Бойко Е.А., Жадовец Е.М., Шишмарев П.В. Численное моделирование процесса образования отложений на полурадиационных поверхностях нагрева БКЗ-420-140 ПТ1 // Проблемы использования канско-ачинских углей на электростанциях: Матер. Всеросс. научно-практ. конф. – Красноярск: СибВТИ, 2000. – С. 382–388.
9. Вдовенко М.И., Бадакер В.С., Киселев Н.Б., Москаленко Л.В. Влияние минеральной части энергетических углей на работу котлоагрегатов. – Алма-Ата: Наука, 1990. – 284 с.
10. Прасолов Г.С. Массо- и теплоперенос в топочных устройствах. – М.-Л.: Энергия, 1964. – 236 с.
11. Деринг И.С. Поведение минеральной части твердого топлива в парогенераторах. – Красноярск: Изд-во КПИ, 1973. – 215 с.
12. Бубенчиков А.М., Старченко А.В. Численные модели динамики и горения аэродисперсных смесей в каналах. – Томск: Изд-во ТГУ, 1998. – 236 с.
13. Старченко А.В., Заворин А.С., Красильников С.В. Применение пакета FIRE 3D к анализу процессов шлакоулавливания // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 2. – С. 152–157.